

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**  
**MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS**

УДК 621.923

Поступила в редакцию 26.06.2015

Received 26.06.2015

**Л. М. Акулович, А. В. Миранович, О. Н. Ворошухо**

*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь,*

**УПРАВЛЕНИЕ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
В ПРОЦЕССАХ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ  
И МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

Рассматривается влияние характера магнитного поля на процессы магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки деталей машин. Установлены режимы магнитно-электрического упрочнения для получения наибольшей стабильности процесса. Предложена схема магнитно-абразивной обработки с целью интенсификации процесса путем регенерации ферроабразивной щетки.

*Ключевые слова:* магнитно-электрическое упрочнение, магнитно-абразивная обработка, магнитное поле, ферроабразивная щетка.

*L. M. AKULOVICH, A. V. MIRANOVICH, O. N. VOROSHUHO*

*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus*

**CONTROL OF MACHINE COMPONENTS SURFACING DURING MAGNETIC-ELECTRIC HARDENING  
AND MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING**

The influence of nature of magnetic field on processes of magnetic-electric hardening and magnetic-abrasive machining of machine parts is examined. Modes of magnetic-electric hardening are set in order to obtain the highest process stability. A scheme of magnetic-abrasive machining is offered to intensify the process by regenerating the ferro-abrasive brush.

*Keywords:* magnetic-electric hardening, magnetic-abrasive machining, magnetic field, ferro-abrasive brush.

**Характер магнитного поля, генерируемого электромагнитными катушками.** Общность процессов магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) и магнитно-абразивной обработки (МАО) состоит в образовании в рабочем зазоре  $\delta$  (рис. 1, а) цепочек ферромагнитного или ферроабразивного порошка (ФМП, ФАП). Влияние квазистационарного внешнего магнитного поля на образовавшиеся цепочки описывается основными уравнениями Максвелла [1, 2]

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \vec{E}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – удельная проводимость среды, См/м;  $\vec{H}$  – вектор напряженности внешнего магнитного поля, А/м;  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля, В/м;  $\vec{B}$  – вектор индукции магнитного поля, Тл.

Так как внешнее магнитное поле в рабочем зазоре генерируется электромагнитом, то при расчетах можно пренебречь токами смещения  $\partial \vec{D} / \partial t$  и использовать дифференциальный закон

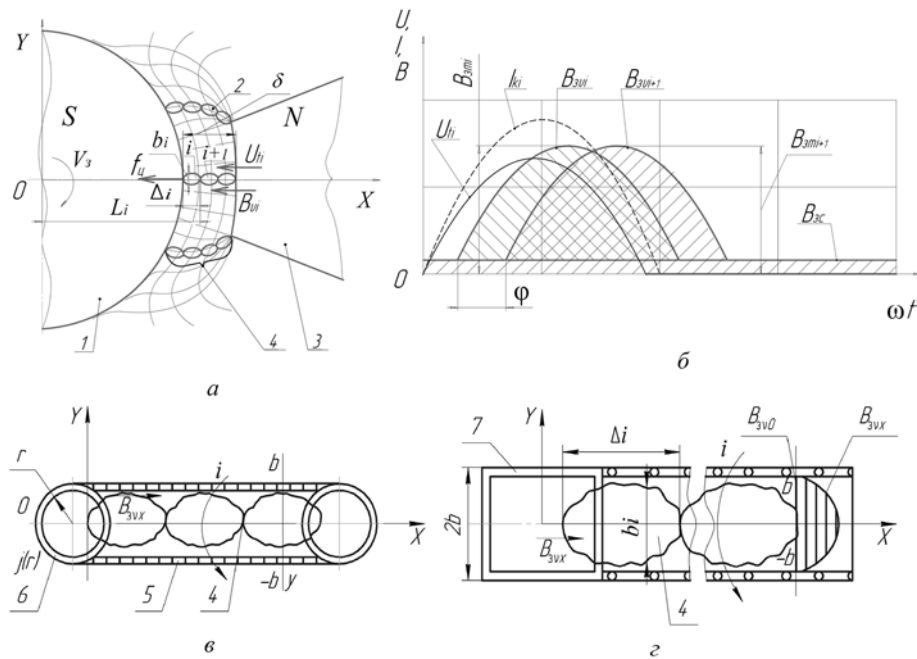


Рис. 1. Схема действия силы прижима  $f_u$  на цепочку ФМП и картина магнитного поля в рабочем зазоре устройств МЭУ и МАО (а), временная диаграмма тока электромагнита ( $I_{ki}$ ) и напряжения источника питания технологического тока ( $U_i$ ), индукций в рабочем зазоре (б), схема цепочки ФМП в рабочем зазоре при расчете индукции с проводником цилиндрической формы (в) и прямоугольной формы (г): 1 – заготовка; 2 – частица порошка; 3 – полюсный накопитель; 4 – цепочка ФМП, 5 – проводник-цилиндр, 6 – соленоид, 7 – плоский соленоид

Ома для токов проводимости [2]. В систему уравнений переменного магнитного поля входят уравнения непрерывности линий магнитной индукции и полного тока [2, 3]:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \operatorname{div} \vec{D} = 0. \tag{3}$$

Выбрав направление силовых линий за ось  $X$  системы координат (рис. 1, в, г), для отличной от нуля компоненты магнитного поля  $B_{zvx}$  из уравнения соленоидальности (3) получим  $(\partial/\partial x)B_{zvx} = 0$  и магнитная индукция может изменяться только поперек направления силовых линий. На основании этого рассмотрим воздействие нестационарного внешнего магнитного поля на цепочку ФМП (рис. 1, в), которая сориентирована вдоль силовой линии (по оси  $X$ ). Примем следующие допущения: цепочку ФМП (рис. 1, г), состоящую из частиц ФМП с размерами малой ( $b_i$ ) и большой ( $\Delta_i$ ) осей, будем рассматривать как однородный проводник, представляющий собой трубку тока в виде сплошного цилиндра 5 (рис. 1, в), у которого величины  $\gamma$ ,  $\epsilon_a$  и  $\mu_a$  постоянные.

В результате преобразования системы (1)–(2) по аналогии с [2], исключая вектор напряженности  $\vec{E}$ , получаем следующие уравнения:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{\gamma} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H}, \tag{4}$$

или

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{1}{\gamma \mu_a} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{B}.$$

где  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м.

Аналогично [2], как и для вектора-потенциала  $\vec{A}$ , введем лапласиан векторного поля  $\Delta \vec{B} = -\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{B} + \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{B}$ .

Приняв за основу, что замкнутый магнитный поток на входе и выходе в объем равен 0, преобразуем уравнения (4) ( $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ ):

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_a} \Delta \vec{B}. \quad (5)$$

Исключая из уравнения (5) вектор напряженности  $\vec{B}$  (плотность свободных зарядов в рассматриваемом проводнике  $\rho = 0$ ) и проведя такие же преобразования, получаем следующее уравнение:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \varepsilon_a} \Delta \vec{E}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м.

Уравнения (5), (6) приведены для мгновенных значений векторов электромагнитного поля и являются уравнениями диффузии [2, 4]. В данном случае примем допущение: исследуемый объект рассматривается как соленоид 6, обеспечивающий воздействие однородного магнитного поля на сплошной проводник (цилиндр) 5, который находится соосно соленоиду (рис. 1, в). После отключения питания соленоида происходит снижение величины магнитного поля внутри проводника до определенного значения, так как в цилиндре присутствуют круговые токи, индуцируемые вихревым электрическим полем. Они рассматриваются как система вставленных друг в друга соленоидов, которые не могут возбуждать стационарное магнитное поле на внешней стороне цилиндра.

В соответствии с [2] задача определения магнитного поля  $B_{3yx}(r, t)$  в самом проводнике (цепочке ФМП)  $r \leq b$  при  $t > 0$  сводится к уравнению

$$\frac{\partial B_{3yx}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_a} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial B_{3yx}}{\partial r} \right), \quad (7)$$

где  $r$  – радиус проводника цилиндрической формы, м;  $t$  – текущее время, с.

Для рассматриваемого варианта уравнения (7) граничные условия будут:  $B_{3yx}(b, t) = 0$  (при  $t > 0$ ) и соответственно начальные условия –  $B_{3yx}(r, 0) = B_{3y0} = \mu_a i_{\text{п}} [2]$ . Здесь  $i_{\text{п}} = I/2r$  – поверхностная плотность тока проводника (ФМП), А/м [5];  $I$  – электрический ток питания электромагнита, А.

Решение поставленной задачи (7) допускается заменой цилиндрической формы соленоида (проводника тока) на прямоугольную форму со сторонами  $2b$  (рис. 1, г) [2, 4]. В соответствии с данным решением задача определения магнитной индукции и характера воздействия поля на цепочку ФМП примет следующий вид:

$$\frac{\partial B_{3yx}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_a} \left( \frac{\partial^2 B_{3yx}}{\partial y^2} \right), \quad |y| < b, t > 0;$$

$$B_{3yx}(-b, t) = B_{3yx}(b, t) = 0, t > 0; \quad (8)$$

$$B_{3yx}(y, 0) = B_{3y0}, |y| \leq b.$$

Ее решение выполняется последовательно для одномерного уравнения диффузии в виде мультипликативных функций

$$B_{3yx}(y, t) = f(t) F(y). \quad (9)$$

В результате преобразований пошагового метода разделения переменных уравнения Лапласа [4] функций  $f(t)$ ,  $F(y)$  получены зависимости

$$\frac{f'(t)}{\nu f(t)} = \frac{F''(y)}{F(y)} = -k^2, \quad (10)$$

где  $\nu = 1/\gamma \mu_a$  – постоянная, м<sup>2</sup>/с;  $k^2$  – произвольная, описывающая затухающий характер квазистационарного магнитного поля в рабочем зазоре.

Преобразовав (9), (10), получим зависимости функций

$$f_n(t) = C_n e^{-\nu k_n^2 t}, \quad F_n(y) = \cos k_n y, \quad (11)$$

где  $C_n$  – коэффициент разложения в ряды Фурье;  $n$  – номер пространственной гармоники;  $k_n$  – коэффициент затухания магнитного поля в рабочем зазоре, 1/м.

Поскольку искомая функция является четной по переменной  $y$  (т. е. изменяется по косинусоидальному закону), принимаем  $k_n = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{b}$ .

В соответствии с методикой [4] формально составляем ряд Фурье, подставив зависимости (11) в уравнение (8)

$$B_{3vx}(y, t) = f_n(t) F_n(y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\nu k_n^2 t} \cos k_n y. \quad (12)$$

Учитывая, что нулевые условия на границах  $y = \pm b$  удовлетворены, для решения (11) неопределенные коэффициенты ряда вычисляются из начального условия – функцию представляем в виде ступенчатой периодической, в пределах  $|y| \leq b$  принимающей постоянное значение  $B_{3v0}$ , на границах  $|y| = b, 3b, 5b, \dots$  меняющей знак на противоположный [2].

В результате составления рядов Фурье установлено, что показатели экспонент, которые имеют номер выше пространственной гармоники, затухают значительно быстрее. В соответствии с этим наибольшее влияние на процесс удержания цепочек ФМП в рабочем зазоре оказывают составляющие первой гармоники, коэффициент разложения которой равен  $C_1 = (4/\pi) B_{3v0} = (4/\pi) \mu_a i_{пр} = (4/\pi) \mu_a I / 2r$  [1, 2] с учетом несинусоидальности тока питания электромагнита, магнитной проницаемости и размеров частиц ФМП. В результате преобразования ряда выражение для определения магнитной индукции на поверхности и внутри цепочки-микроэлектрода примет следующий вид:

$$B_{3vx1}(y, t) = \frac{4}{\pi} B_{3vx0} e^{-\frac{1}{\gamma \mu_a} \left(\frac{\pi}{2b}\right)^2 t} \cos\left(\frac{\pi}{2b}\right) y = \frac{4}{\pi} B_{3vx0} e^{-\frac{t}{t_3}} \cos \frac{\pi y}{2b}, \quad (13)$$

где  $t_3 = \gamma \mu_a (2b)^2 / \pi^2$  – время, характеризующее затухание магнитного поля в проводнике (цепочке ФМП), с.

С учетом размеров частицы ФМП (рис. 1, з) величина времени, необходимая для затухания магнитного поля в цепочке-микроэлектроде (или проникновения на глубину частицы ФМП  $l_i = b_i / 2$ ), определяется по формуле

$$t_3 = \gamma \mu_a b_i^2 / 4,$$

где  $b_i$  – размер малой оси эллипсоида, описывающего  $i$ -ю частицу ФМП, м.

На основании выполненного численного расчета выражения (13) установлено, что значение величины магнитной индукции на поверхности цепочки ФАП составляет  $B_{3vx1} = 0,76$  Тл, а величина времени затухания магнитного поля в цепочке-микроэлектроде  $t_3 = 0,2 \cdot 10^{-3}$  с.

Анализ выражений (13) показал, что значения магнитной индукции переменны во времени. При этом гармонический характер изменения напряженности внешнего магнитного поля приводит к изменению во времени величин силы прижима  $f_{ц}$  частиц ФМП к обрабатываемой поверхности заготовки детали [10]:

$$f_{ц} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i^2 b_i K B_{vi}^2}{\mu(L_i + \Delta_i)}, \quad (14)$$

где  $n$  – число частиц в цепочке ФМП;  $L_i$  – расстояние от границы  $i$ -й частицы до оси упрочняемой поверхности, м;  $\Delta_i, b_i$  – размеры большой и малой осей эллипсоида, описывающего  $i$ -ю частицу ФМП, м;  $K$  – магнитная восприимчивость материала ФМП;  $B_{vi}$  – мгновенная индукция внешнего переменного магнитного поля на границе  $i$ -й частицы порошка в рабочем зазоре, Тл.

Следовательно, сила прижима  $f_{ц}$  цепочки ФМП к обрабатываемой поверхности определяется размерами его частиц и неоднородностью внешнего магнитного поля в рассматриваемой точке

рабочего зазора. Оно неоднородно и ограничено эквидистантными поверхностями полюсного наконечника и обрабатываемой поверхностью заготовки. Используемые электрические магниты, как нелинейные элементы электрической цепи в магнитной системе устройств МЭУ и МАО, генерируют индукцию  $B_{vi}$ , текущее значение которой непостоянно.

Влияние неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре на стабильность формирования и устойчивое положение цепочек ФМП рассмотрим с учетом амплитудной и временной составляющих индукции. Мгновенная индукция внешнего магнитного поля в точке  $(x_i, y_i)$  цепочки ФМП, находящейся в рабочем зазоре (рис. 1, б), изменяется по косинусоидальному закону [6, 7]

$$B_{3vi} = B_{3mi} \cos \omega t, \quad (15)$$

где  $B_{3mi}$  – амплитудная величина индукции внешнего магнитного поля в точке  $(x_i, y_i)$  цепочки ФМП, находящейся в рабочем зазоре, Тл;  $\omega$  – круговая частота магнитного поля, рад/с;  $t$  – текущее время, с.

В другой точке цепочки ФМП  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  индукция внешнего магнитного поля может отличаться как по амплитуде, так и по фазе:

$$B_{3vi+1} = B_{3mi+1} \cos(\omega t + \varphi), \quad (16)$$

где  $\varphi$  – сдвиг по фазе между векторами индукций магнитного поля  $B_{3vi}$  и  $B_{3vi+1}$ , рад.

Учитывая, что для электромагнитных катушек стандартной I-образной конструкции, питаемых током промышленной частоты, угол  $\varphi$  мал (порядка  $5 \cdot 10^{-3}$  рад) [8], получаем

$$\frac{B_{3vi+1} - B_{3vi}}{B_{3vi}} = \frac{B_{3mi+1} - B_{3mi}}{B_{3mi}} + \frac{B_{3mi+1}}{B_{3mi}} \frac{\varphi}{\operatorname{tg} \omega t}. \quad (17)$$

Поскольку значение отношения амплитудных величин магнитной индукции  $B_{3mi+1} / B_{3mi}$  близко к единице, то выражение для оценки влияния неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре на стабильность формирования и устойчивое положение цепочек ФМП примет следующий вид:

$$\frac{B_{3vi+1} - B_{3vi}}{B_{3vi}} = \frac{B_{3mi+1} - B_{3mi}}{B_{3mi}} + \frac{\varphi}{\operatorname{tg} \omega t}. \quad (18)$$

Выражение (18) позволяет учитывать амплитудную  $(B_{3mi+1} - B_{3mi}) / B_{3mi}$ , временную или фазовую  $(\varphi / \operatorname{tg} \omega t)$  составляющие (рис. 1, б) индукции внешнего магнитного поля с достаточной точностью.

**Рациональный характер магнитного поля для процесса магнитно-электрического упрочнения.** Для установления влияния амплитудной и фазовой составляющих индукции на силу прижима  $f_{\text{ц}}$  проведены исследования и численный расчет неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре установки МЭУ модели ЭУ-5 при питании электромагнита I-образной конструкции однофазным выпрямленным током по одно- и двухполупериодной схемам силой и напряжением, соответственно изменяемыми в пределах 3–5 А и 12–36 В. Эксперименты по измерению амплитудного значения индукции в рабочем зазоре выполнялись с помощью тесламетра ТИ-10 (погрешность измерения не более 2,5 %) со специальными датчиками Холла. Величина фазового сдвига магнитного потока в различных точках рабочего зазора определялась путем измерения линейной развертки при подаче напряжений на входы каналов вертикального отклонения [9] с использованием универсального осциллографа С1-77.

Результаты экспериментальных исследований (табл. 1) показывают, что неоднородность в рабочем зазоре наиболее характерна для переменного внешнего магнитного поля, генерируемого электромагнитом, питаемым однофазным током по однополупериодной схеме. Амплитудная и фазовая составляющие индукции превышают в 2,25–3,0 и 2,25–2,5 раза составляющие неоднородности магнитного поля, формируемого электромагнитом, питаемым однофазным током по

двухполупериодной схеме. Значение постоянной магнитной индукции в 2 раза меньше величины индукции при переменном магнитном поле.

Установлено, что наибольшее влияние на силу прижима цепочки ФМП к обрабатываемой поверхности оказывает фазовая составляющая индукции, с увеличением частоты (100 Гц и более) питания которой ее значение снижается до нуля. При этом гармонический характер изменения величины  $B_{\nu}$ , наиболее выражен для однополупериодной схемы выпрямления и определяет импульсное периодическое воздействие силы прижима  $f_{\text{ц}}$  на цепочки ФМП в рабочем зазоре устройства МЭУ.

Анализ динамики изменения параметров зависимости (17) при их взаимодействии показывает, что переменные составляющие магнитной индукции влияют на силу прижима  $f_{\text{ц}}$  и соответственно на стабильность и устойчивость цепочек ФМП и их электрическую проводимость в точке контакта [10]

$$R_{i(i+1)} = p_f t_f / (\pi r_k^2 f_{\text{ц}}^{0,75}), \quad (19)$$

где  $p_f$  – удельное сопротивление окисной пленки, Ом·м;  $t_f$  – суммарная толщина окисной пленки, м;  $r_k$  – радиус зоны контакта, м.

Для исследования интенсивности образования цепочек ФМП под воздействием внешнего магнитного поля установлено, что магнитные поля (частотой 12,5 и 50 Гц) недостаточно однородны (рис. 2, а). Последнее не обеспечивает устойчивого положения цепочек ФМП.

Исследования синхронности следования импульсов напряжений источника питания электромагнита ( $U_{ki}$ ) и источника технологического тока модели Invertec V270 Т ( $U_{ti}$ ) в рабочем зазоре установки МЭУ модели ЭУ-5 выполнялись с помощью универсального осциллографа С1-77. По изменению импульсов напряжения источника питания электромагнитов и источника технологического тока инверторного типа модели Invertec V270 Т оценивали величину интенсивности образования во времени цепочек ФМП в рабочем зазоре и их участие в электрических разрядах с последующим переносом расплава частиц ФМП на обрабатываемую поверхность. Киносъемка процесса формирования цепочек ФМП и прохождения по ним электрических разрядов выполнялась камерой модели СКС-1М. Питание исследуемых электромагнитных катушек осуществлялось однофазным выпрямленным током по однополупериодной схеме, а также источником, обеспечивающим прямоугольные импульсы с частотой 12,5 Гц.

Результаты осциллографических исследований показывают, что синхронность следования импульсов напряжения источников внешнего магнитного поля и технологического тока в рабочем зазоре затруднена вследствие питания сварочного источника инверторного типа трехфазным током (частота пульсации до 80 кГц), а электромагнитной катушки однофазным током, выпрямленным по одно- и двухполупериодной схемам (частота пульсаций 50 и 12,5 Гц соответственно). Установлено, что для электромагнитной системы источника технологического тока с электромагнитом, питание которого осуществляется выпрямленным током по однополупериодной схеме, в момент паузы тока в катушке электромагнита минимальное значение магнитной индукции не обеспечивает стабильного формирования цепочек ФМП в рабочем зазоре. Вследствие этого электрические разряды отсутствуют, процесс МЭУ протекает неустойчиво с пульсирующим горением цепочек ФМП в рабочем зазоре. Для магнитной системы с электромагнитом, питаемым током с прямоугольными импульсами частотой 12,5 Гц, изменение во времени величины индукции незначительно влияет на интенсивность образования цепочек ФМП в рабочем

Т а б л и ц а 1. Результаты исследования неоднородности внешнего магнитного поля в рабочем зазоре устройства МЭУ

Схема питания источника магнитного поля	Среднее значение величины магнитной индукции, Тл		Фазовый сдвиг, рад	Неоднородность магнитного поля, %	
	амплитудная	постоянная		амплитудная	фазовая
Однополупериодная	0,75	0,32	$(5-7) \cdot 10^{-3}$	6–9	18–25
Двухполупериодная	0,78	0,63	$(3-4) \cdot 10^{-3}$	2–4	8–10

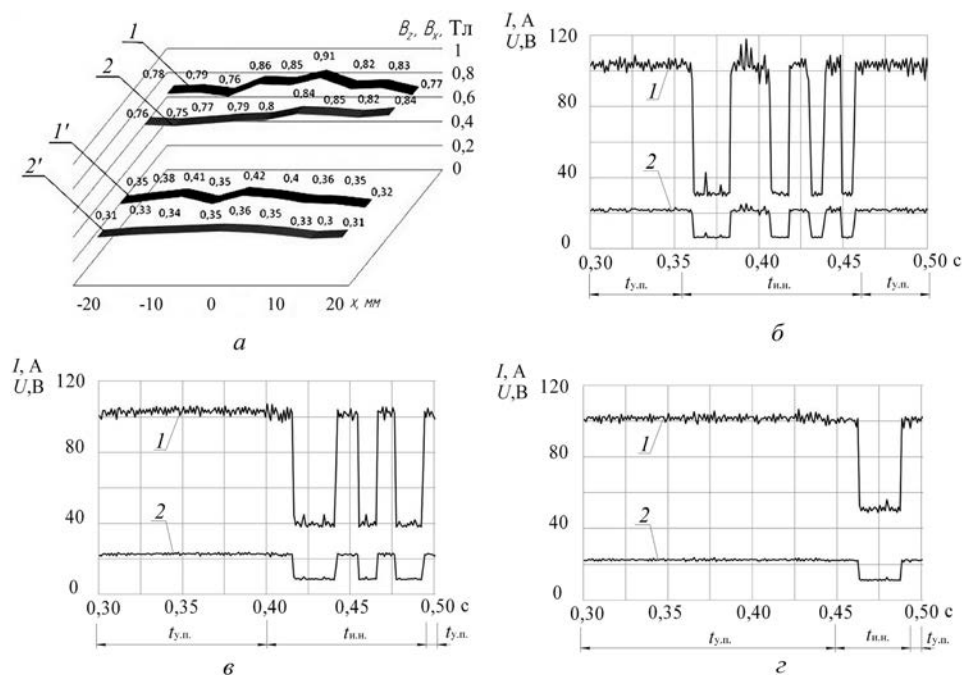


Рис. 2. Диаграммы распределения в рабочем зазоре продольной  $B_z$  (1, 2) и поперечной  $B_x$  (1', 2') составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре при частотах 50 (1, 1') и 12,5 Гц (2, 2') (а), осциллограммы технологического тока (1) и напряжения (2) (б, в, з);  $t_{y.n.}$  – участок установившегося процесса МЭУ;  $t_{н.н.}$  – участок импульсной нестабильности процесса МЭУ

зазоре и перенос расплава на поверхность детали. Это объясняется небольшой пульсацией напряжения источника питания внешнего магнитного поля.

Анализ кинограмм следования электрических разрядов в рабочем зазоре в процессе МЭУ показал, что частота повторяемости участков импульсной нестабильности процесса наплавки в 2,2–2,85 раза меньше для источника технологического тока и электромагнита, питаемого напряжением частотой 12,5 Гц. Это связано с меньшими значениями переменных составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре и обеспечивает более устойчивое положение цепочек ФМП, стабильное формирование и развитие электрических разрядов.

Для определения зависимости сплошности покрытий  $G$  от величины магнитной индукции  $B$  в рабочем зазоре и плотности разрядного тока проведены экспериментальные исследования.

Оправка с образцами из стали 45 с наружным диаметром 40 мм, внутренним диаметром 16 мм и толщиной 10 мм устанавливалась в патрон установки. В момент начала вращения образцов из контейнера в рабочий зазор одновременно подавались ферромагнитный порошок Fe–2%V и смазочно-охлаждающая жидкость (эмульсол Э-2Б), включался источник технологического тока.

Независимыми переменными были технологические факторы – величина магнитной индукции в рабочем зазоре  $X_1$  ( $B_{3c}$ ) и плотность разрядного тока  $X_2$  ( $i$ ), оказывающие основное влияние на значение магнитно- и электродинамических сил, действующих на частицы ФМП в рабочем зазоре [11].

Постоянными факторами приняты следующие: рабочий зазор  $\delta = 2,0$  мм; размер частиц ФМП  $\Delta = 240\text{--}320$  мкм; скорость вращения образцов  $V = 0,05$  м/с; расход ФМП  $q = 2,8 \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>); расход рабочей жидкости  $q = 2,0 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/(с·мм<sup>2</sup>); длина  $R_{п.}$ , высота рабочего торца  $h$  и угол охвата полюсного наконечника  $\alpha$  соответственно 15 мм, 5,7 мм и 12 град; ферромагнитный порошок Fe–2%V ГОСТ 9849–86; форма постоянного магнита прямоугольная с габаритными размерами 100×80×40 мм, материал ЮНДК18. Значения величины магнитной индукции в рабочем зазоре обеспечивались изменением расстояния между магнитотвердым материалом и образцами посредством перемещения постоянного магнита по направляющим пазам сердечника с полюсным наконечником.

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице центрального композиционного рототабельного равномер-плана второго порядка, с использованием стандартного пакета Excel Microsoft Office позволила получить математико-статистическую модель в нормированном виде, определяющую зависимость сплошности покрытий  $G$  от основных характеристик магнитного и электрического полей  $B_{zc}$  и  $i$ :

$$Y = 90,990 + 6,286 \cdot X_1 + 4,245 \cdot X_2 - 2,417 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2,366 \cdot X_1^2 - 0,573 \cdot X_2^2. \quad (20)$$

Выявлено, что все коэффициенты регрессии (20) значимы с 95%-ной доверительной вероятностью по критерию Стьюдента. Также установлено, что статистическая модель адекватна при 5%-ном уровне значимости по критерию Фишера.

Графическое отображение модели (20) представлено одномерными сечениями функции отклика  $Y$  в двумерной системе координат (рис. 3). Анализ модели (20) позволил определить степень влияния технологических факторов на сплошность покрытий и расположить их в порядке убывания значимости:  $G: B_{zc} \rightarrow i$ .

На основе анализа зависимостей (рис. 3) можно сделать вывод, что для магнитной индукции в рабочем зазоре  $B_{zc}$  и плотности разрядного тока  $i$  рациональными являются диапазоны, при которых удовлетворяются следующие условия:  $0,65 < B_{zc} < 0,75$  Тл и  $1,80 < i < 1,95$  А/мм<sup>2</sup>.

Анализ результатов осциллографирования (рис. 2, б) показывает, что для процесса МЭУ характерно преобладание участков импульсной нестабильности, имеющих диапазон изменения разрядного тока 30–118 А (относительное отклонение тока 74,6 %). Для периодов стабильного процесса наплавки отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 12 А (значения коэффициентов вариации плотности тока  $k_{vi} = 39,3$  % и сплошности покрытий  $k_{vG} = 21,4$  %).

Установлено, что повторяемость периодов стабильного процесса МЭУ и участков импульсной нестабильности одинаковая (рис. 2, в). При этом сила разрядного тока изменяется для участков импульсной нестабильности в пределах 38–102 А (относительное отклонение тока 62,7 %), для периодов стабильного процесса МЭУ отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 8 А. Величины коэффициентов вариации плотности тока  $k_{vi}$  и сплошности  $k_{vG}$  покрытий соответственно составляют 26,1 и 11,4 %.

В результате ранее принятых технологических ограничений и численного расчета с помощью математического пакета MathCAD определены величины магнитной индукции в рабочем зазоре и плотности разрядного тока. Результаты выполненных расчетов показывают, что при  $B_{zc} = 0,7$  Тл,  $i = 1,95$  А/мм<sup>2</sup> обеспечивается наибольшая сплошность покрытий, равная, 95,1 %. Процесс МЭУ протекает стабильно с формированием покрытия, состоящего из плотно расположенных точечных капель расплава. Анализ результатов осциллографирования (рис. 2, г) показывает, что для МЭУ характерно преобладание периодов стабильного процесса, для которых отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 5 А. На участках импульсной нестабильности сила разрядного тока изменяется в пределах 49–101 А (относительное отклонение тока 51,5 %).

На основании выполненных экспериментальных исследований установлено, что максимальная сплошность покрытий ( $G = 95,1$  %) обеспечивается при величине магнитной индукции в рабочем зазоре  $B_{zc} = 0,7$  Тл и плотности разрядного тока  $i = 1,95$  А/мм<sup>2</sup>. Установлено, что высокую стабильность процесса МЭУ и высокое качество покрытия (значения коэффициентов вариации плотности тока  $k_{vi} = 26,1$  % и сплошности покрытий  $k_{vG} = 11,4$  %) обеспечивают магнитотвердые материалы с рабочим зазором 2,0 мм, высотой рабочего торца полюсного наконечника 5,7 мм и углом охвата 12 град.

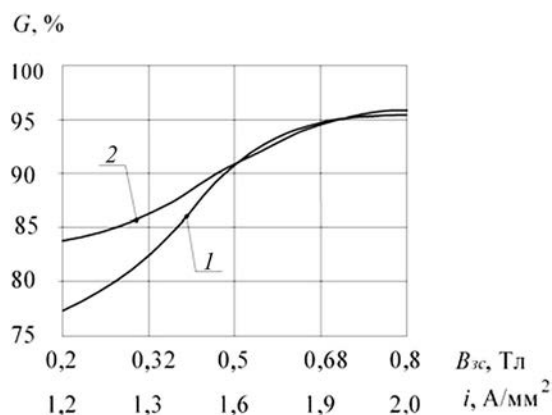


Рис. 3. Зависимость сплошности покрытий  $G$  от величины магнитной индукции  $I$  в рабочем зазоре и плотности разрядного тока  $2$



Результаты исследований показывают, что стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения обеспечивается применением постоянного магнита.

**Рациональный характер магнитного поля для процесса магнитно-абразивной обработки.** В процессе MAO ферроабразивная щетка теряет свою режущую способность в результате затупления частиц ФАП и выкрашивания абразивной составляющей.

При магнитно-абразивной обработке неоднородность магнитного поля в рабочем зазоре оказывает положительный эффект на процесс самоорганизации ферроабразивной щетки. В результате явлений самоорганизации частиц ФАП обработка поверхностей деталей производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т. е. на протяжении всего цикла имеет место процесс ориентированного абразивного резания, что в свою очередь увеличивает производительность обработки и качество обработанного поверхностного слоя.

По мере засаливания продуктами микрорезания и в результате уплотнения цепочек ФАП (рис. 4, а) процесс самоорганизации ферроабразивной щетки становится невозможным. Возникает необходимость регенерации ферроабразивной щетки с целью интенсификации MAO.

Использование установки для MAO с основной и дополнительной магнитными системами (рис. 4, б) с их поочередным включением позволяет восстанавливать режущую способность ферроабразивной щетки за счет перемешивания ФАП в рабочем зазоре.

Установка для MAO содержит основную магнитную систему, состоящую из катушек индуктивности 1, магнитопровода 3, полюсных наконечников 2 и источника питания (на рис. 4, б не показан). Дополнительная магнитная система состоит из катушки индуктивности 4, полюсного наконечника 5 и источника питания (на рис. 4, б не показан). Магнитопровод у основной и дополнительной систем общий. Обрабатываемая деталь 6 находится между полюсами основной магнитной системы. Полюсный наконечник дополнительной магнитной системы установлен под углом  $90^\circ$  к полюсным наконечникам основной магнитной системы.

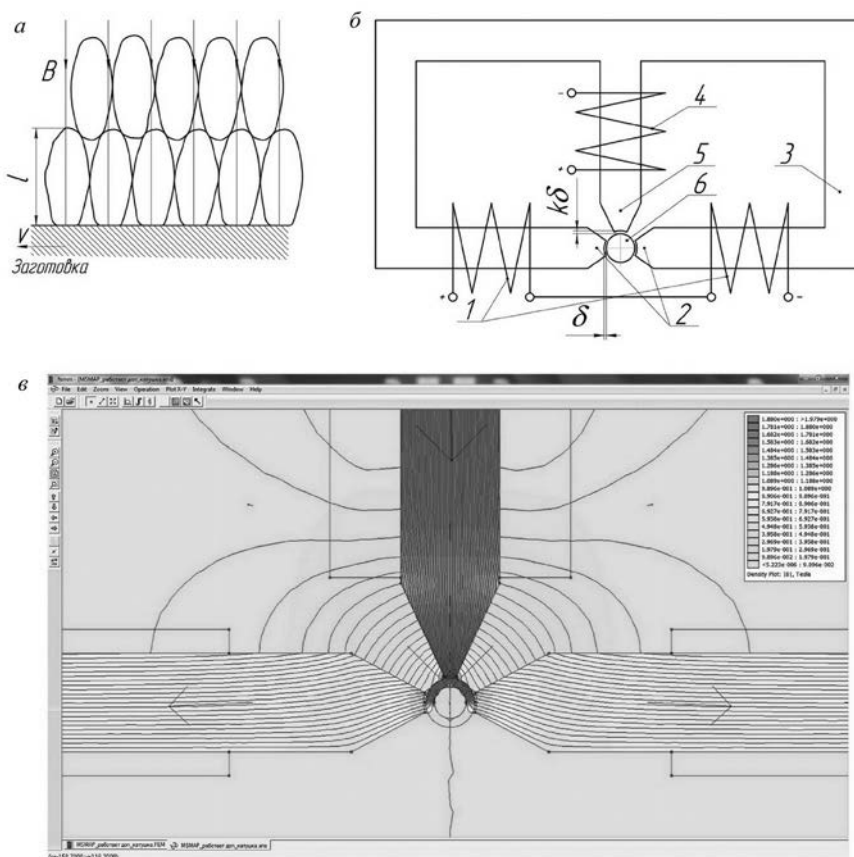


Рис. 4. Картина уплотнения частиц ферроабразивной щетки (а), схема установки MAO с дополнительной магнитной системой (б), топография магнитного поля при работе дополнительной магнитной системы (в) ( $V$  – скорость вращения заготовки,  $l$  – длина наибольшей оси ферроабразивной частицы)

Т а б л и ц а 2. Результаты эксперимента

№ образца	Условия регенерации	$Ra$ до MAO, мкм	$Ra$ после MAO, мкм	$Q$ , мг
1	Без регенерации	1,14	0,51	80
2	Без регенерации	1,25	0,80	20
3	Регенерация 20×2	1,03	0,50	70

Рабочие зазоры  $\delta$  между полюсами основной магнитной системы и обрабатываемой деталью заполняются порцией ФАП.

Установка работает следующим образом: порция ферроабразивного порошка прижимается к обрабатываемой поверхности нормальной силой резания, обусловленной магнитным полем ( $B_v = 0,9$  Тл) основной магнитной системы, производится обработка поверхности детали на протяжении времени  $t_0$ . Затем производится отключение подачи напряжения на катушки основной магнитной системы и включение на катушку дополнительной магнитной системы на время  $t_d$ , при этом наблюдается перемещение порции порошка из рабочего зазора основной магнитной системы в зазор  $k\delta$  (коэффициент  $k = 1,5-2,0$ ) дополнительной магнитной системы.

При работе дополнительной катушки в рабочем зазоре  $k\delta$  наводится электромагнитная индукция, равная  $B_v = 1,9$  Тл, и обрабатываемая заготовка подвергается кратковременному воздействию мощного магнитного поля. Топография магнитного поля при работе дополнительной магнитной системы получена в программе Femm 4.2 (рис. 4, в). Затем дополнительная система отключается и включается основная система. Во время переключения систем происходит перемещение порции ФАП из одного рабочего зазора в другой и его перемешивание. В результате чего осуществляется процесс переориентирования ферроабразивных частиц большей осью вдоль силовых линий магнитного поля, что является затруднительным во время постоянной работы магнитов из-за высокой плотности ферроабразивных частиц в рабочем зазоре.

Регенерация режущей способности ферроабразивной щетки поочередным включением основной и дополнительной магнитных систем позволяет интенсифицировать процесс MAO.

В ходе эксперимента на модернизированной установке ЭУ-6 установлено положительное влияние дополнительной магнитной системы на производительность MAO. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Условия проведения эксперимента: магнитная индукция основной магнитной системы  $B_{ov} = 0,9$  Тл; магнитная индукция дополнительной магнитной системы  $B_{dv} = 1,5$  Тл; рабочий зазор основной магнитной системы  $\delta_0 = 1$  мм; рабочий зазор дополнительной магнитной системы  $\delta_d = 1,7$  мм; зернистость ферроабразивного порошка FeTiC  $\Delta = + 200-315$  мкм; время обработки  $\tau_0 = 90$  с; скорость главного движения  $V = 0,9$  м/с; интервал включения дополнительной магнитной системы  $u = 20$  с; продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы  $\tau_d = 2$  с. Образцами служили поршневые пальцы ( $Ddl = 25 \cdot 16 \cdot 66$  мм, материал – сталь 15X, твердость поверхностного слоя 58–62 HRC). **Выходные показатели:** достигаемая шероховатость поверхности деталей  $Ra$ , мкм; массовый съем металла  $Q$ , мг. Измерение как исходной, так и достигаемой шероховатости поверхности производилось на профилографе-профилометре Mitutoyo SJ-201P. Детали взвешивались на весах Massa-K BK-600 с точностью до 0,01 г.

Все образцы обрабатывались одной порцией порошка, смена образцов производилась без отключения напряжения на катушках основной магнитной системы, при этом не разрушалась ферроабразивная щетка. Образцы № 1, № 2 обрабатывались без регенерации ферроабразивной щетки. Обработка образца № 3 выполнялась с регенерацией ферроабразивной щетки (через каждые 20 с отключалась основная магнитная система и включалась на 2 с дополнительная,  $B_{dv} = 1,5$  Тл).

### Выводы

1. Теоретически и экспериментально установлено влияние характера внешнего магнитного поля на изменение во времени величин силы прижима  $f_{ц}$  частиц ферромагнитного порошка к обрабатываемой поверхности детали при магнитно-электрическом упрочнении и магнитно-абразивной обработке.

2. Экспериментально установлено, что наибольшую стабильность процесса МЭУ обеспечивают постоянные магниты с величиной индукции, равной 0,7 Тл, в рабочем зазоре 2,0 мм при высоте полюсного наконечника 5,7 мм и угле охвата 12°.

3. В ходе эксперимента выявлено, что дополнительная магнитная система, расположенная под углом 90° к основной, повысила производительность магнитно-абразивной обработки в 3,5 раза, что позволяет обрабатывать большее количество деталей одной порцией порошка без потери качества.

### Список использованной литературы

1. Кингсеп, А. С. Основы физики. Курс общей физики: учебник в 2 т. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика / А. С. Кингсеп, Г. Р. Локшин, О. А. Ольхов. – М. : Физматлит, 2001. 560 с.
2. Яковлев, В. И. Классическая электродинамика: учеб. пособие. Ч. 1. Электричество и магнетизм. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2003. 267 с.
3. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учеб. пособие для студентов вузов ; в 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 2005. 656 с.
4. Юдаев, Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача : учебник / Б. Н. Юдаев. – М. : Высшая школа, 1988. 479 с.
5. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2001. 317 с.
6. Борисов, Ю. М. Электротехника: учебник для вузов / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. – М. : Энергоатомиздат, 1985. 552 с.
7. Башарин, С. А. Теоретические основы электротехники: Теория электрических цепей и электромагнитного поля : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / С. А. Башарин, В. В. Федоров. – М. : Изд. центр «Академия», 2004. 304 с.
8. Герасимов, В. Г. Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – Изд-во МЭИ, 2003. 518 с.
9. Метрология и радиоизмерения: учебник для вузов / В. И. Нефедов и [др.]; под ред. В.И. Нефедова. – 2-е изд., перераб. – М. : Высшая школа, 2006. 526 с.
10. Акулович, Л. М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк : ПГУ, 1999. 240 с.
11. Ракомсин, А. П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / А. П. Ракомсин; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: Парадокс, 2000.

### References

1. Kingsep, A. S., Lokshin, G. R. and Ol'khov, O. A. (2001), *Osnovy fiziki. Kurs obshchei fiziki: uchebnik v 2 t. T. 1. Mekhanika, elektrichestvo i magnetizm, kolebaniya i volny, volnovaya optika* [Fundamentals of Physics. The course of general physics. A tutorial in 2 volumes, vol. 1. Mechanics, electricity and magnetism, vibration and waves, wave optics], Fizmatlit, Moscow, RU.
2. Yakovlev, V. I. (2003), *Klassicheskaya elektrodinamika: ucheb. posobie. Ch. 1. Elektrichestvo i magnetizm* [Electrodynamics: a tutorial, part 1. Electricity and Magnetism], Novosib. gos. un-t, Novosibirsk, RU.
3. Landau, L. D. and Lifshits, E. M. (2001), *Teoreticheskaya fizika: ucheb. posobie dlya studentov vuzov, v 10 t. T. 8. Elektrodinamika sploshnykh sred* [Theoretical physics: a textbook for students; 10 volumes, vol. VIII. Electrodynamics of Continuous Media], Nauka, Moscow, RU.
4. Yudaev, B. N. (1988), *Tekhnicheskaya termodinamika. Teploperedacha: uchebnik* [Engineering Thermodynamics. Heat transfer: a textbook], Vysshaya shkola, Moscow, RU.
5. Bessonov, L. A. (2001), *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoe pole* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electromagnetic field], Gardariki, Moscow, RU.
6. Borisov, Yu. M., Lipatov, D. N. and Zorin, YU. N. (1985), *Elektrotekhnika: uchebnik dlya vuzov* [Electrical engineering: a textbook for universities], Energoatomizdat, Moscow, RU.
7. Basharin, S. A. and Fedorov, V. V. (2004), *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: Teoriya elektricheskikh tsepei i elektromagnitnogo polya: ucheb. posobie dlya stud. vyssh. ucheb. Zavedenii* [Theoretical foundations of electrical engineering: Electrical circuits and electromagnetic field theory: a textbook for university students], Izd. tsentr «Akademiya», Moscow, RU.
8. Gerasimov, V. G., D'yakov, A. F., Il'inskii, N. F., Labuntsov, V. A., Morozkin, V. P., Orlov, I. N., Popov, A. I. and Stroeve, V. A. (2003), *Elektrotekhnicheskii spravochnik: v 4 t. T. 2. Elektrotekhnicheskie izdeliya i ustroystva* [Electrical engineering reference book: 4 volumes, vol. 2. Electrotechnical products and devices], Izd-vo MEI, Moscow, RU.
9. Nefodov, V. I., Khakhin, V. I. and Bitjukov, V. K. (2006), *Metrologiya i radioizmereniya: uchebnik dlya vuzov* [Metrology and radio measurements: a textbook for universities], Vysshaya shkola, Moscow, RU.
10. Akulovich, L. M. (1999), *Termomekhanicheskoe uprochnenie detalei v elektromagnitnom pole* [Thermomechanical detail hardening in the electromagnetic field], PGU, Polotsk, BY.
11. Rakomsin A. P. (2000), *Uprochnenie i vosstanovlenie izdelii v elektromagnitnom pole* [Hardening and restoration items in the electromagnetic field], in Vityaz', P. A. (ed.), *Paradoks*, Minsk, BY.

### Информация об авторах

*Акулович Леонид Михайлович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология металлов». Белорусский государственный аграрный технический университет (220023, г. Минск, проспект Независимости, 99, Беларусь). E-mail: [leo-akulovich@yandex.ru](mailto:leo-akulovich@yandex.ru)

*Миранович Алексей Валерьевич* – кандидат технических наук, декан факультета «Технический сервис в АПК». Белорусский государственный аграрный технический университет (220023, г. Минск, проспект Независимости, 99, Беларусь). E-mail: [miron23@tut.by](mailto:miron23@tut.by)

*Ворошуха Олег Николаевич* – ассистент кафедры «Технология металлов». Белорусский государственный аграрный технический университет (220023, г. Минск, проспект Независимости, 99, Беларусь). E-mail: [voro-shuho@tut.by](mailto:voro-shuho@tut.by)

### Для цитирования

Акулович, Л. М. Управление обработкой поверхностей деталей машин в процессах магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, О. Н. Ворошуха // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 37–48.

### Information about the authors

*Akulovich Leonid Mikhailovich* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor, the Department “Metal Technology”. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus). E-mail: [leo-akulovich@yandex.ru](mailto:leo-akulovich@yandex.ru)

*Miranovich Alexey Valerievich* – Ph. D. (Engineering), Dean of the faculty “Technical service in the agro-industrial complex”. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus). E-mail: [miron23@tut.by](mailto:miron23@tut.by)

*Voroshuho Oleg Nikolaevich* – assistant of the Department “Metal Technology”. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus). E-mail: [voro-shuho@tut.by](mailto:voro-shuho@tut.by)

### For citation

Akulovich L. M., Miranovich A. V., Voroshuho O. N. Control of machine components surfacing during magnetic-electric hardening and magnetic-abrasive machining. Proceeding of the National academy of sciences of Belarus, physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 37–48.